

Monitorización Remota de Señales Respiratorias en Niños

Tomás Robles⁽¹⁾, Eduardo Pico⁽¹⁾, Carlos Nossa⁽²⁾, Miguel Villacorta⁽³⁾, Daniel Fuertes⁽³⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Telemática

⁽²⁾Departamento de Tratamiento de la Señal en Comunicaciones

⁽³⁾Departamento de Tecnología Fotónica
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
Madrid, España

Abstract- Este artículo describe un sistema diseñado para permitir la monitorización remota de niños con problema de apnea y la detección temprana de la apnea. El Sistema se ha desarrollado en colaboración con los doctores del Hospital de la de LA PAZ para poder identificar las funcionalidades clave y las señales más adecuadas para el contexto del proyecto. El objetivo final del sistema es mejorar la calidad de vida de los pacientes que necesitan monitorización, así como aumentar la información recogida en un formato procesable que permita su posterior análisis con algoritmos más potentes que los utilizados en la actualidad. El desarrollo de algunos de estos algoritmos también forma parte del proyecto. El sistema recoge los datos en tiempo real a partir de monitores de uso normal en el entorno hospitalario, permitiendo mediante un análisis local de los datos la detección temprana de la apnea. En paralelo los datos son transferidos a una base de datos central, desde donde pueden ser procesados con algoritmos más potentes o visualizados mediante navegadores Web.

I. INTRODUCCIÓN

Los trastornos respiratorios en la infancia, si no son atendidos inmediatamente, pueden generar eventos con riesgo vital inmediato caracterizados clínicamente por el cese de la respiración (apnea), cambios en la coloración (palidez, cianosis), disminución del tono muscular (flacidez) y ahogo.

Actualmente, los monitores de apnea infantil permiten recoger la información proporcionada por los sensores de diferentes tipos: electrocardiograma, movimientos respiratorios y saturación de oxígeno. El médico establece previamente los niveles de alarma para cada uno de los parámetros recogidos por los sensores. Cada cierto tiempo los padres deben llevar el monitor al hospital donde el médico descarga la información almacenada para su ulterior análisis. Mediante esta información el médico solo puede comprobar, transcurridas unas semanas, que ha ocurrido algún evento crítico en cuyo caso indicaría una vigilancia más intensa.

El sistema de monitorización que se utilizado actualmente adolece de los siguientes inconvenientes:

1. Ante una alarma del monitor, los padres se encuentran desorientados por carecer de apoyo médico inmediato.
2. Las falsas alarmas (por desconexión de electrodos, fallos del sistema, movimientos del niño) generan en los padres una angustia innecesaria motivando visitas al Hospital e ingresos injustificados.
3. El procesamiento de las señales es básico: sólo se establecen límites de alarma sin caracterizar de forma predictiva los eventos cardiorrespiratorios graves impidiendo actuar oportunamente.
4. Los sensores actualmente en uso (electrodos, cables, pulsógrafos digitales) suponen una incomodidad que

limita la calidad de vida del niño mientras las señales se deterioran con los movimientos dificultando a su vez el diagnóstico.

5. Los parámetros medidos no permiten establecer un diagnóstico diferencial entre apnea obstructiva y central lo cual requiere nuevos y costosos estudios.

Para resolver estas limitaciones el proyecto STAR pretende combinar las capacidades de las redes convergentes IP (combinando tecnologías SIP con aplicaciones Web 2.0), con las técnicas de análisis de señal para caracterizar, analizar y detectar los episodios de apnea.

II. LA APNEA Y LAS SEÑALES RELACIONADAS

Existen dos técnicas fundamentales para la monitorización de la respiración: flujo aéreo medido en la boca, nariz ó vía aérea (ó en combinación) y algún tipo de medida relacionado con la expansión del pulmón y del tórax provocados por el esfuerzo respiratorio y que se visualizan como movimientos más ó menos sincronizados de ambas estructuras.

En la bibliografía se utilizan tres métodos para medir la respiración:

- A. Flujo aéreo: que puede medirse mediante Pneumotacógrafo intercalado en la vía aérea, considerado el “gold standard”; mascarilla facial con pneumotacógrafo “mesh screen”; termistores y termografía en los orificios nasales y en la boca; cánula nasal conectada a un transductor de presión; y analizador de CO₂
- B. Mediciones relacionadas con el esfuerzo respiratorio, mediante: detectores del movimiento del tórax y/o abdomen; pletismógrafos de impedancia, “strain gauge” e inductancia; pneumografía; magnetómetros; TAC; y RM
- C. Detectores del movimiento corporal mediante: radar basado en microondas; y mantas con sensores de movimiento

Una vez estudiado el proceso de apnea desde un punto de vista médico se aborda el problema de establecer qué informaciones pueden permitirnos el análisis del mismo mediante un conjunto de algoritmo que trabajen sobre las señales que se pueden recoger de un paciente.

En primer lugar se abordó una revisión bibliográfica exhaustiva y se procedió a contrastar datos de los registros de apnea capturados en el hospital de La Paz, con los existentes en las bases de datos directamente relacionadas con esta problemática: Apnea-ECG Database y MIT-BIH Polisomnographic Database. Ambas bases de datos se encuentran contenidas en Physionet: The Research Resource for Complex Physiologic Signals [1], que es un referente internacional para contrastar resultados de investigación. Del estudio realizado sobre la bibliografía y las señales encontradas en estas bases de datos hemos llegado a la conclusión de que los parámetros más representativos de los procesos de apnea

son: Señal electrocardiográfica; Saturación de oxígeno y Señal respiratoria.

En el resto del artículo se describe la arquitectura general del sistema, el sistema de comunicaciones, las funcionalidades

principales del sistema de visualización Web, la estructura del algoritmo de análisis de señal y los planes para el despliegue y operación del sistema.

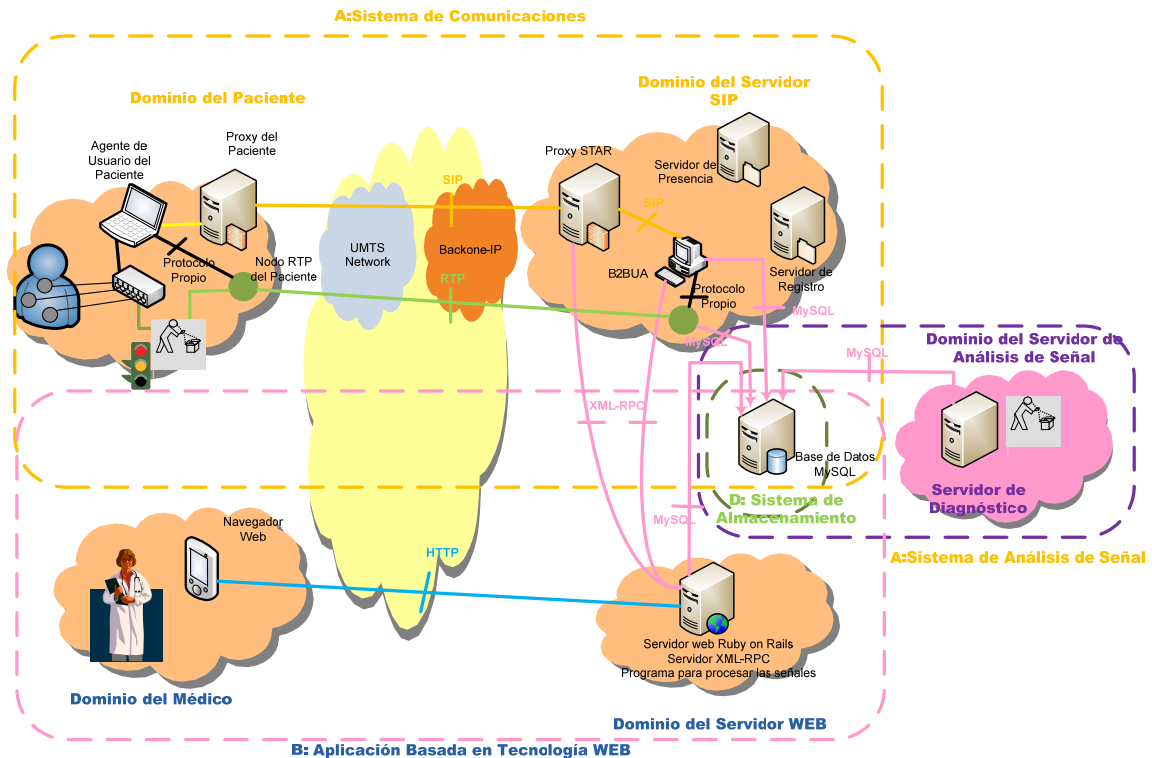


Fig. 1. Arquitectura del Sistema.

III. ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA

El proyecto STAR pretende resolver las carencias de los sistemas actuales de monitorización y detección de apneas, desarrollando una infraestructura de comunicaciones que permita la comunicación permanente entre los sensores de cada paciente y un centro de análisis de señales situado en el hospital y, de éste a su vez, con los médicos responsables del enfermo.

Para ello, se ha desarrollado una arquitectura que permite el intercambio de datos entre los sensores y el Sistema de Almacenamiento. A la vez, esta arquitectura permite que los doctores accedan de forma remota a la Aplicación Central para así poder utilizar y controlar la información procedente de los sensores.

Otro de los objetivos propuestos es caracterizar el patrón respiratorio normal de un niño y analizar si existen factores que permitan anticipar los episodios de apnea mediante el análisis de las señales disponibles. De esta manera, se obtendrá un sistema capaz de predecir los posibles episodios de riesgo.

En el diseño de la arquitectura general del sistema, cuyo esquema se incluye en la Fig. 1, se pueden distinguir cuatro partes:

- Un Sistema de Comunicaciones que permite el intercambio de información entre los sensores del paciente y el Sistema de Almacenamiento. Gracias a esta infraestructura, se lleva a cabo la recogida, la transferencia y el almacenamiento de los datos de cada paciente. Esta comunicación se basa en el Protocolo de Inicio de Sesión SIP (Session Initiation Protocol) [2], y abarca el Dominio del Paciente y el Dominio del Servidor SIP.
- Una Aplicación basada en tecnologías Web para que los doctores puedan visualizar los datos de los sensores de forma remota. Los médicos son los usuarios de la aplicación, que se autentican en la misma mediante usuario y contraseña. Existe

una cuenta especial de administrador, que accede a una parte especial de la aplicación desde la cual puede realizar tareas como dar de alta y borrar a usuarios y pacientes. La arquitectura de la Aplicación Web comprende el Dominio del Servidor Web y el Dominio del Médico.

- Un Sistema de Diagnóstico capaz de detectar los posibles episodios de apnea a partir de la información de los sensores que se vaya recogiendo. Este sistema se localiza en el Dominio del Servidor de Diagnóstico.
- Un Sistema de Almacenamiento, la intersección de A, B y C, que almacena la información de los sensores y otros datos relevantes para el sistema. Dado que funciona como base de datos para los otros elementos de la arquitectura, se ha colocado en zona neutral.

A continuación describiremos las principales características de cada uno de los subsistemas que componen esta Arquitectura.

IV. SISTEMA DE COMUNICACIONES

El sistema de comunicaciones está basado en el protocolo SIP y en redes móviles 3G (UMTS) para la transmisión de datos desde emplazamientos en los que no se disponga de conexiones fijas de banda ancha. El uso del protocolo SIP es totalmente transparente a la red móvil, para la que esta información constituye un tráfico de datos. SIP es un protocolo de señalización de la capa de aplicación que permite crear, modificar y terminar sesiones multimedia en una red IP entre dos o más participantes. Es un estándar del IETF (Internet Engineering Task Force), especificado en el RFC 326.

Se ha escogido SIP por su flexibilidad y escalabilidad, y por tener diversas extensiones que facilitan el diseño de nuevas aplicaciones y servicios, como es el caso.

Está basado en mensajes textuales y sigue una estructura de petición-respuesta basada en el modelo cliente-servidor. En SIP existen dos elementos básicos: los servidores proxies, encargados

de manejar y direccionar los mensajes de señalización, y los agentes de usuario, que son los componentes finales entre los que se establecen las sesiones multimedia. En esta arquitectura, se ha escogido la configuración más típica en SIP, conocida con el nombre de “trapezoide SIP”. Consta de dos proxies SIP que enrutan los mensajes intercambiados entre dos agentes de usuario. En la Fig 1 se pueden distinguir estos elementos. Por una parte, están los dos proxies, el Proxy del Paciente y el Proxy STAR y, por otra, el Agente de Usuario del Paciente, y el agente de usuario B2BUA (Back-to-Back User Agent).

SIP funciona en colaboración con otros protocolos, como RTP (Real Time Transport Protocol) [3], para el transporte en tiempo real de los datos recogidos de los sensores del paciente.

Una sesión de datos abarca el espacio de tiempo en el cual se está recogiendo y enviando la información procedente de los sensores. El inicio y la gestión de dicha sesión se llevan a cabo mediante señalización SIP, mientras que el envío de los datos se realiza por medio de RTP.

Dentro del sistema de Comunicaciones tenemos el dominio del Servidor SIP y el dominio del paciente. El Dominio del Servidor SIP contiene el Proxy STAR que es el elemento central del sistema de comunicaciones. A través de él pasan y se encaminan todos los mensajes SIP. Este servidor se encarga de autenticar a los pacientes, mediante los nombres de usuario del sistema. Los nombres de usuario se gestionan en la aplicación Web, la cual informa al Proxy STAR mediante el protocolo XML-RPC de cualquier cambio producido. El Dominio del paciente engloba los distintos elementos situados en el entorno del paciente. Los sensores recogerán los datos vitales del enfermo. Estos datos se transfieren mediante una conexión RTP entre el Nodo RTP del Paciente y el Nodo RTP del B2BUA. Para ello, se creará previamente una sesión multimedia entre los dos agentes de usuario mediante señalización SIP, negociando los parámetros de dicha sesión gracias al protocolo de negociación de sesiones SDP (Session Description Protocol)[4].

Se ha diseñado una arquitectura de señalización y control de sesiones multimedia mediante el protocolo SIP, que incluye mecanismos para realizar las siguientes funcionalidades:

- Localización de usuarios, mediante el registro de las direcciones en uso con el fin de poder localizar a los usuarios.
- Negociación e inicio de sesiones, en concreto, selección de las características, formatos y tipo de información que se desea y se puede intercambiar en cada sesión.
- Gestión de la información de presencia de los pacientes, mediante una infraestructura que permite tanto la publicación de la información como la recepción de notificaciones de los cambios de presencia producidos.
- Otras funcionalidades avanzadas, basadas principalmente en un sistema de mensajería instantánea (IM).

Para la recogida de señales se ha utilizado el equipo RGB-OMICROM. Este equipo permite la entrega de datos mediante un interfaz RS232. Para poder recoger estos datos y entregarlos al sistema de comunicaciones y de procesamiento local de las señales, ha sido necesario desarrollar un software específico en el Cliente del Omicrom que facilita y hace lo más transparente posible las interacciones con el equipo de monitorización..

V. APLICACIÓN BASADA EN TECNOLOGÍAS WEB

Para cubrir los objetivos del proyecto en cuanto a flexibilidad y facilidad de acceso desde cualquier terminal conectado a Internet, se decidió desarrollar una aplicación basada en tecnologías web. En el lado del cliente se necesita únicamente un navegador web, mientras que en el lado del servidor se ha desarrollado el código necesario mediante AJAX y Java para entregar la información al navegador en el formato adecuado.

Conceptualmente, la aplicación basada en tecnologías web se divide en dos partes: dominio del médico, y dominio del servidor

web. El dominio del médico permite el acceso de este al sistema mediante un navegador web, desde un ordenador con acceso a Internet. En el navegador se ejecuta una aplicación web, al que se accede tecleando la URL inicial de la aplicación en la barra de direcciones.

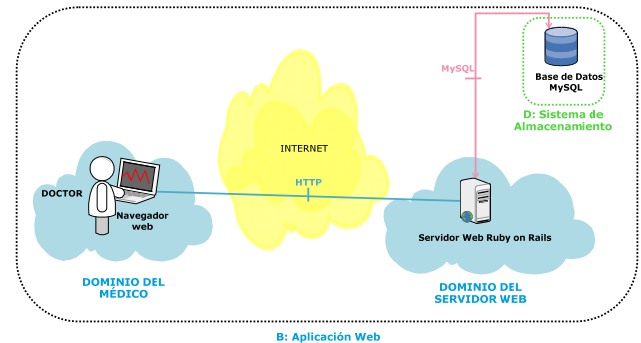


Fig. 2. Gestión de usuarios y aplicación web del médico

La aplicación web (ver Fig. 1) cumple dos funcionalidades: la gestión de los usuarios, y la visualización de las señales desde un navegador estándar. Para la gestión de los usuarios se han creado unas páginas que permiten dar de alta a pacientes y médicos, así como realizar las asignaciones de pacientes a médicos.

La aplicación web utiliza gráficos SVG para mostrar información gráfica de los pacientes, como por ejemplo la grabación de un electrocardiograma durante cierto periodo de tiempo (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Scalable Vector Graphics (SVG) es una especificación XML y un formato de fichero que describe gráficos vectoriales en dos dimensiones, tanto estáticos como animados. SVG puede ser puramente declarativo o puede incluir scripting. Puede contener imágenes utilizando hipervínculos. Es un estándar abierto creado por el W3C (World Wide Web Consortium).

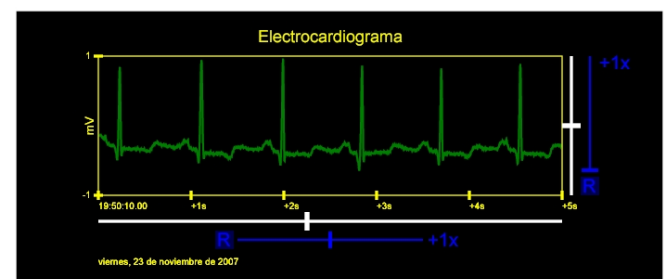


Fig. 3. Visualización de señales mediante interfaz web

En el dominio del servidor web se ejecutan varios procesos, entre ellos un servidor web. El servidor web tiene detrás el framework Ruby on Rails generando las páginas dinámicas de una aplicación web. Ruby on Rails es un framework gratuito para crear aplicaciones web, cuyo objetivo es aumentar la velocidad y facilidad con la que se pueden crear sitios web basados en una base de datos. Se suele escribir Rails o RoR para abreviar. Ruby on Rails es un proyecto de código abierto escrito en el lenguaje de programación Ruby.

El visualizador de señales utiliza varias técnicas para despliegue dinámico de datos: para los datos gráficos se utiliza la funcionalidad del scripting en las imágenes SVG, incluido dentro de la declaración del visualizador SVG. Para la actualización del contenido de la página con los mensajes procesados en la base de datos, se utiliza la técnica de desarrollo web para crear aplicaciones interactivas AJAX (Asynchronous Javascript And XML), de esta forma se realizan cambios sobre una parte de la página sin tener que recargar y finalmente la actualización de datos en la página se realiza periódicamente mediante el llamado a la función Javascript (periodicexecuter).

El visualizador ofrece dos posibilidades: el visualizador estático en el cual se pueden desplegar todos los datos recientemente recibidos o los mensajes ya almacenados de sesiones anteriores, de esta manera el medico puede revisar y analizar los datos recogidos que no haya podido visualizar en tiempo real; y el visualizador dinámico que automáticamente despliega los últimos datos recogidos con una señal gráfica en movimiento, de esta forma el medico ve los datos que se están recogiendo, almacenando y visualizando en tiempo real.

VI. SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

El módulo de proceso de señales recibe del monitor RGB-OMNITOR tres señales además de información técnica complementaria sobre su estado. Estas señales, junto con la información técnica y los resultados del análisis se enviarán a la base de datos. También se utilizarán para generar alarmas. El esquema general de procesado está representado en la Fig. 4.

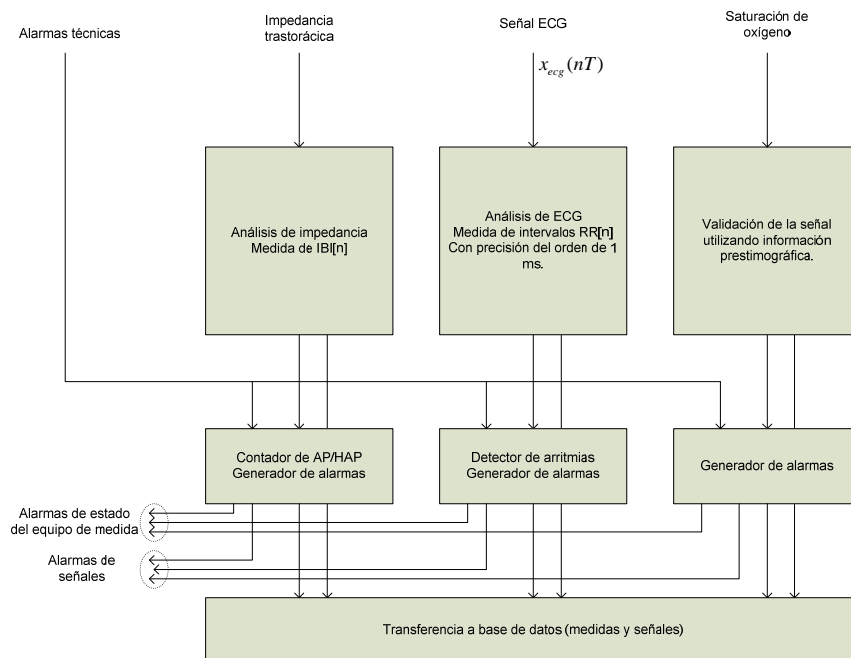


Fig. 4. Esquema general de procesado de señales

VII. DESPLIEGUE Y OPERACIÓN

Actualmente se dispone de un prototipo funcionando en la ETSIT. Este prototipo se encuentra en fase de prueba y evaluación como fase previa a su despliegue y operación en el hospital de LA PAZ. En una primera etapa se utilizará una parte del dominio del paciente para realizar una recogida de datos reales de pacientes actualmente ingresados en LA PAZ. Con estos datos se procederá a ajustar los algoritmos de detección de apnea.

En paralelo se están realizando las tareas necesarias para desplegar el sistema completo en el mismo Hospital. Esto nos permitirá operar el sistema recogiendo datos de los pacientes reales ingresado, almacenando la información en la ETSIT y permitiendo su acceso mediante tecnologías Web a los doctores desde el propio hospital o desde cualquier otra ubicación. En esta fase se ajustará el funcionamiento global del sistema para prepararlo para la última etapa: el despliegue domiciliario.

Además se están probando los equipos de comunicaciones que mediante módems UMTS de banda ancha permitan la conexión inalámbrica desde las diferentes plantas de LA PAZ con el servidor localizado en la ETSI Telecomunicación. Integrando estas comunicaciones con el sistema ya desarrollado se monitorizarán pacientes ingresado en el Hospital.

Finalmente se procederá a operar el sistema en los domicilios de una serie de pacientes seleccionados por LA PAZ, permitiendo una monitorización domiciliaria en tiempo real de los pacientes. Para este tipo de situaciones, está en estudio la utilización del concepto de nodo doméstico UMTS, que básicamente consiste en una estación base UMTS de potencia muy reducida, similar en tamaño al de un router WiFi, que se conecta a la red móvil vía una conexión ADSL, y que se sitúa en el domicilio del paciente, proporcionándole cobertura UTMS en su interior.

VIII. CONCLUSIONES

Este trabajo describe un sistema de monitorización para niños con trastornos respiratorios, que ofrece sobre los actualmente existentes en los hospitales una serie de ventajas como: posibilidad de integrar nuevos algoritmos más precisos en un sistema abierto no dependiente del fabricante de los equipos; adecuada monitorización de pacientes en sus domicilios y en movilidad mediante el uso de redes IP inalámbricas de banda ancha; y posibilidad de reacción inmediata por parte de los doctores ante cualquier problema respiratorio detectado por el sistema. Todo ello conduce a una mejora en la calidad asistencial de los pacientes y sus familias que requieren este tipo de monitorización.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo descrito en este artículo está basado en los resultados del proyecto STAR (*Sistema telefónico de Alarma Respiratoria Infantil*), apoyado económica y técnicamente por Telefónica Móviles de España S. A. U., y en el que participan El Hospital de LA PAZ y la ETSI Telecomunicación de la universidad politécnica de Madrid.

REFERENCIAS

- [1] www.physionet.org.
- [2] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley y E. Schooler, "SIP: Session Initiation Protocol", Internet Eng. Task Force RFC 3261, Junio de 2002.
- [3] H. Schulzrinne, S. Casner, F. Frederick y V. Jacobson, "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications", Internet Eng. Task Force RFC 1889, Enero de 1996.
- [4] M. Handley y V. Jacobson, "SDP: Session Description Protocol", Internet Eng. Task Force RFC 2327, Abril de 1998.